



UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA
CARRERA INGENIERIA QUIMICA

**PROYECTO DE TITULACION PRESENTADO COMO REQUISITO PARA
OPTAR POR EL TÍTULO DE**

INGENIERO QUIMICO

**“OPTIMIZACION DE PROCESOS DE EXTRUSIÓN PARA
ALIMENTO ACUICOLA DE LA PLANTA GISIS 4,5”**

AUTORES:

**MARIA DOLORES MONTALVO MORANTE
EDUARDO ANDRES VELAZCO FRANCO**

TUTOR: Ing. ALFREDO LEAL CHATONG, MSc.

GUAYAQUIL, MAYO 2017

Dedicatorias

Doy gracias a Dios por permitirme terminar una meta más en mi vida.

Dedico de manera especial a mi mamá, pues ella fue el principal cimiento para la construcción de mi vida profesional, sentó en mí las bases de responsabilidad y deseo de superación, en ella tengo el espejo en el cual me quiero reflejar, pues sus virtudes infinitas y su gran corazón me llevan a admirarla cada día más.

Les dedico este trabajo primeramente a mis padres que han sido apoyo máximo durante esta etapa de mi vida, a Dios por darme la motivación y el esfuerzo que se necesitaba, y a mis amigos que siempre han estado apoyándome para lograr esta meta.

Agradecimientos

A mi hermano, mi familia en general y a mi novio que son personas que siempre han estado a mi lado, y a aquellas personas que ya no se encuentran con nosotros, mi abuelita Maria Mc-Gregor y mi abuelo Jorge Montalvo.

Quiero agradecer al Ec. Carlos Miranda quien nos dio, a mi compañera y a mi, la grata bienvenida a sus instalaciones para desarrollar este trabajo de investigación, agradecer a mi tutor por agilizarme un proceso de titulación y enseñarme nuevos caminos en esta carrera; y finalmente a mis padres que siempre fueron un pilar de apoyo muy grande para el desempeño de este trabajo.

Tabla de contenido

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. Antecedentes | 2 |
| 1.2. Planteamiento del problema..... | 2 |
| 1.3. Requerimiento del problema..... | 3 |
| 1.4. Restricciones del problema..... | 3 |
| 1.5. Objetivos | 4 |
| 1.5.1. Objetivos General | 4 |
| 1.5.2. Objetivos Específicos | 4 |
| 1.6. Hipótesis | 4 |
| 1.6.1. Hipótesis General | 4 |
| 1.6.2. Variables dependientes..... | 4 |
| 1.6.3. Variables independientes..... | 4 |
| 1.7. Metodología | 5 |
| 1.7.1. Área de estudio..... | 5 |
| 1.7.2. Diseño metodológico | 5 |
| 2. Marco teórico | 7 |
| 2.1. Proceso de extrusión | 7 |
| 2.2. Instrumentación y control..... | 10 |
| 2.2.1. Control de temperatura..... | 11 |
| 2.3. Extrusoras de doble tornillo | 14 |
| 2.4. Partes de un extrusor | 15 |
| 2.4.1. Tolva..... | 15 |
| 2.4.2. Barril de extrusión (cilindro) | 16 |
| 2.4.3. El Tornillo de Extrusión | 16 |
| 2.4.4. Sistema de calentamiento | 17 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 2.4.5. | Plato Rompedor Y Filtros | 17 |
| 2.4.6. | Cabezal y Boquilla | 18 |
| 2.4.7. | Cabezal de corte | 18 |
| 3. | Metodología de la investigación | 19 |
| 3.1. | Enfoque investigativo..... | 19 |
| 3.2. | Alcance de la investigación..... | 19 |
| 3.3. | Pregunta de investigación..... | 19 |
| 3.4. | Hipótesis de investigación | 20 |
| 3.5. | Elección del diseño de investigación | 20 |
| 4. | Modelamiento matemático para el análisis de la optimización al proceso de extrusión..... | 21 |
| 4.1. | Nomenclatura..... | 22 |
| 4.2. | Modelamiento del extrusor | 22 |
| 4.2.1. | Balance de masa..... | 23 |
| 4.2.2. | Balance de energía..... | 23 |
| 4.2.3. | Balance de energía mecánica | 25 |
| 4.2.4. | Validación experimental del modelo..... | 27 |
| 5.1 | Conclusiones | 31 |
| 5.2 | Recomendaciones..... | 31 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Fig. 1-1 Estado actual del proceso de extrusión..... | 5 |
| Fig. 2-1 Secciones funcionales de un extrusor típico de comida..... | 8 |
| Fig. 4-1 Aproximación del modelo..... | 22 |
| Fig. 4-2 Modelo experimental de operación..... | 28 |
| Fig. 4-3 Configuración del extrusor..... | 28 |
| Fig. 4-4 Cabezal del extrusor..... | 29 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 4-1 Recopilación de datos brutos para el producto T-280-7..... | 29 |
| Tabla 4-2 Tabla comparativa de reducción de grados y el aumento de la producción..... | 30 |

INDICE DE ECUACIONES

| | |
|---|----|
| Ecuación 4-1 Ecuación de balance de masa..... | 23 |
| Ecuación 4-2 Ecuaciones de balance de masa usando el ratio entre gases y líquidos..... | 23 |
| Ecuación 4-3 Ecuación de balance de energía | 23 |
| Ecuación 4-4 Ecuación de disipación de viscosidad para una mezcla laminar | 24 |
| Ecuación 4-5 Ecuación de disipación de viscosidad simplificada..... | 24 |
| Ecuación 4-6 Ecuación de viscosidad del compuesto T-280-7 | 24 |
| Ecuación 4-7 Ecuación de pérdida de calor por fricción..... | 24 |
| Ecuación 4-8 Ecuación del calor suministrado | 25 |
| Ecuación 4-9 Ecuación del coeficiente de transferencia de calor..... | 25 |
| Ecuación 4-10 Ecuación de balance de energía mecánica | 25 |
| Ecuación 4-11 Ecuación de presión de trabajo | 26 |
| Ecuación 4-12 Ecuación de trabajo de arrastre..... | 26 |
| Ecuación 4-13 Ecuación del trabajo total generado | 26 |



UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL
FACULTAD INGENIERIA QUIMICA
CARRERA INGENIERIA QUIMICA



TEMA: OPTIMIZACION DE PROCESOS DE EXTRUSIÓN PARA ALIMENTO
ACUICOLA

AUTORES: MARÍA DOLORES MONTALVO MORANTE, EDUARDO ANDRÉS VELAZCO FRANCO

TUTOR: MSc. ALFREDO LEAL CHATONG

RESUMEN EJECUTIVO

Los modelos matemáticos representan un papel muy importante en procesos químicos debido a que se estable como una herramienta fundamental al momento de simular procesos térmicos.

En la presente investigación, se va investigar si el proceso de extrusión tiene influencia o no en el producto final, de una empresa que produce productos acuícolas. En algunos trabajos se realizan modelos matemáticos complejos, simulando los vectores de calor, la convergencia, perdida, entre otros; sin embargo, se quiere dar un planteamiento sencillo y de fácil implementación para lo cual se usara modelamiento para simular el proceso.

Se asume en esta investigación que existe una correlación entre la cantidad de producto final producido y la eficiencia del extrusor, esto se justifica debido a que se tienen compuestos orgánicos que son sensibles a su composición. Lo que indica que se van a evaluar dos resultados finales, antes de aplicar el modelo y luego de aplicar el modelo para determinar si es que hubo o no mejora en términos de producción y calidad.

La eficiencia del extrusor determinara si se pueden presentar problemas de flotación u otros problemas similares

Se logro comprobar que la temperatura de operación del extrusor tiene una correlación directa con el problema de no conformidad lo cual conlleva a un mayor nivel de producción. Esto comprueba la hipótesis de investigación, sin embargo vale la pena recalcar que se pueden hacer mas avances en este tipo de investigaciones y mas específicamente en el modelo matemático.

Se pueden quitar asunciones que se han hecho y generalizarlo para otro producto. Así mismo se pueden considerar mas perdidas también se puede sacar la función de transferencia del mismo para tener un modelo mas completo y ver como se complementan.

Palabras clave: Optimización, modelamiento dinámico, extrusor, alimentos

aquí colas



UNIVERSITY OF GUAYAQUIL
FACULTY OF CHEMICAL ENGINEERING
CHEMICAL ENGINEERING



**DYNAMIC MODELING AND OPTIMIZATION FOR A FISH FEED FOOD
EXTRUDER**

AUTHORS: MARÍA DOLORES MONTALVO MORANTE, EDUARDO ANDRÉS VELAZCO FRANCO

TUTOR: MSC. ALFREDO LEAL CHATONG

Abstract

Mathematical models represent a very important role in chemical processes because it is a fundamental tool when simulating thermal processes.

In the present work, it will be investigated whether or not the extrusion process influences the final production of a company that manufactures aquaculture products. In some works, complex mathematical models are performed, simulating heat vectors, convergence, loss, among others; However, we wanted to give a simple and easy implementation for which dynamic modeling will be used to simulate the process.

It is assumed that there is a correlation between the amount of final manufactured product and the efficiency of the extruder; this is justified because there are organic compounds that are sensitive to their composition. This indicates that two final results will be evaluated, before applying the model and then applying the model to determine whether or not there was improvement in terms of production and quality.

The efficiency of the extruder will determine whether flotation problems or other similar problems

It was found that the operating temperature of the extruder has a direct correlation with the non-conformity problem, which leads to a higher level of production. This confirms the research hypothesis, however it is worth emphasizing that more advances can be made in this type of research and more specifically in the mathematical model.

You can remove assumptions that have been made and generalize it for another product. Likewise can be considered more lost also can be removed the transfer function of the same to have a more complete model and see how they complement each other.

Keywords: Optimization, dynamic modeling, extrusion, fish feed

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Los modelos matemáticos representan un papel muy importante en procesos químicos debido a que se estable como una herramienta fundamental al momento de simular procesos térmicos.

En la presente investigación, se va investigar si el proceso de extrusión tiene influencia o no en el producto final, de una empresa que produce productos acuícolas. En algunos trabajos se realizan modelos matemáticos complejos, simulando los vectores de calor, la convergencia, perdida, entre otros; sin embargo, se quiere dar un planteamiento sencillo y de fácil implementación para lo cual se usara modelamiento dinámico para simular el proceso.

Se podrá dar retroalimentación al modelo matemático para la cual se ha recopilado datos de la temperatura a la entrada y a la salida del extrusor, de tal manera que se pueda probar el modelo matemático generado. Para poder verificar la viabilidad del mismo se va a hacer un análisis post-producción.

Se asume en esta investigación que existe una correlación entre la cantidad de producto final producido y la eficiencia del extrusor, esto se justifica debido a que se tienen compuestos orgánicos que son sensibles a su composición. Lo que indica que se van a evaluar dos resultados finales, antes de aplicar el modelo y luego de aplicar el modelo para determinar si es que hubo o no mejora en términos de producción y calidad.

La eficiencia del extrusor determinara si se pueden presentar problemas de flotación u otros problemas similares

1.1. Antecedentes

Un continuo desarrollo en la tecnología del proceso de extrusión ha llevado en el incremento en el número de aplicaciones para extrusores. Desde aplicaciones prácticas para productos de manufactura básica; plástico, entre otros. Hasta aplicaciones en la industria alimenticia, esto ha llevado a que sean ampliamente estudiados, y se hayan elaborado diferentes trabajos con ellos

1.2. Planteamiento del problema

Actualmente existe un problema de no conformidad en las empresas de producto acuícola, el cual se debe controlar o reducir. Esto previene la cantidad de reprocesamientos y reclamos al momento de generar el producto final.

El calor generado dentro del extrusor juega un papel muy importante en este fenómeno; debido a que este determinará la calidad del extruso final producido.

Es por esta razón que debe controlarse la temperatura del extrusor, para que esta sea óptima; lo cual puede ser realmente difícil porque va a depender del producto a procesar, más específicamente de su composición.

Actualmente en las empresas que usan extrusores para generar alimentos se tiene que el proceso es realizado a mano, basados en la experiencia del operador. Esto puede ser contraproducente debido a que si el mismo se equivoca puede incurrir en gastos de producción.

Es por esta razón que es de gran utilidad realizar un modelo matemático del extrusor como tal, esto permitirá poder analizar cuáles son las variables de desempeño y así mismo optimizarlos para que funcionen a una temperatura óptima generando la menor cantidad de producto extruido con problema de no conformidad.

1.3. Requerimiento del problema

Para se pueda aplicar el modelo matemático aquí establecido la fabrica, deberá cumplir con los siguientes parámetros:

- Manufactura de productos acuícolas, con énfasis en la producción de camarón.
- Utilizar el extrusor de tornillo simple Wenger X-185 en su proceso de extrusión.
- Utilizar como producto una concentración de T-280-7.

1.4. Restricciones del problema

En este trabajo se hace una estudio de una planta de producción de alimento acuícola la cual pasa por un proceso de extrusión, este modelo serviría solo para plantas que produzcan alimentos para peces, específicamente tilapia. Así mismo este modelo es sensible al estado de la molienda producida, la dosificación. Se necesita que el producto sea conforme para poder tener un resultado efectivo. La contaminación cruzada también puede generar problemas al obtener la temperatura ideal.

Se asume que el rendimiento del extrusor es de un 75%, todo el calor se condensa en el extrusor, se mantiene un proceso continuo y se aplicara únicamente para el modelo Wenger X-185, el cual es de tornillo simple y posee un motor de 250 HP y tiene un torque de 1191 RPM

Así mismo este modelo no asume los efectos de un post-tratamiento, es decir, la cantidad de producto final aceptado o valido puede variar por de efectos post-tratamiento. Se considerara una temperatura y presión ideal al exterior del extrusor

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivos General

Generación de un modelo matemático para optimizar el proceso de extrusión una planta productora de alimento acuícola.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Calcular la temperatura ideal del proceso de extrusión para reducir la no conformidad del producto.
- Verificar el modelo matemático del proceso de extrusión en una planta operativa.
- Realizar por medio de Matlab / Simulink el modelo específico de la planta.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis General

El modelo matemático generado podrá encontrar la temperatura ideal para optimizar el proceso de extrusión.

1.6.2. Variables dependientes

- Producción obtenida

1.6.3. Variables independientes

- Inyección de agua.
- Presión del extrusor.
- Temperatura del extrusor.
- Flujo másico.
- Flujo por inyección de vapor.
- Dosificación de ingredientes del producto.

1.7. Metodología

1.7.1. Área de estudio

La ubicación de la empresa es en el km. 4.5 de vía a Duran-Tambo, en Guayaquil provincia del Guayas, Ecuador.

1.7.2. Diseño metodológico

Para este trabajo se realizará un modelo matemático con la finalidad de poder determinar la temperatura de operación óptima que genere la mayor cantidad de producto extruido sin problema de no conformidad.

Para esto se van a realizar diferentes procesos para generar el modelo final, vale la pena recalcar que el modelo se lo va a hacer simulando las características básicas del proceso. En lugar de simular el controlador del proceso de extruido.

El proceso de extruido actual en el sistema de la empresa por las siguientes etapas:

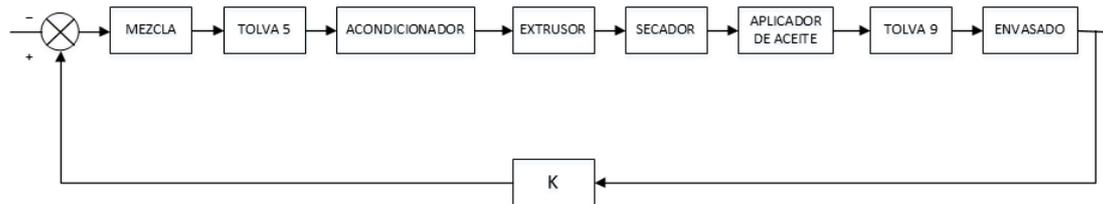


Fig. 1-1 Estado actual del proceso de extrusión.

Se realizó el diagrama de bloques anterior para poder visualizar como se realiza el proceso, del mismo se puede apreciar que el proceso es un sistema retroalimentado; debido a que una vez que el producto final no cumple con los parámetros de aceptación se lo reingresa a la línea de producción para ser reprocesado.

También se puede apreciar que el proceso de extruido es central en este sistema de operación por lo cual la calidad del producto final va a depender directamente del proceso de extruido.

Se recopilaron datos del proceso actual para poder medir las condiciones iniciales y poder establecer en el modelo matemático las restricciones de las variables y así mismo las condiciones de frontera.

Estos datos son de la recopilación inicial la cual nos permite poder establecer cual será el mejor modelo a seguir. De esta manera podemos determinar que como el extrusor es un proceso cerrado el cual depende de si mismo es difícil de modelar solo basados en las entradas y salidas del mismo. Por lo cual se va a realizar lo siguiente se va a considerar al barril del extrusor de tornillo simple como una serie de etapas conectadas entre si a las cuales se le van a emplear las ecuaciones de transferencia de masa y calor. Siendo así el modelamiento dinámico es la mejor la mejor opción para generar el matemático.

Así mismo luego de establecer un modelo se va a usar un software de simulación comercial para predecir los estados de la temperatura optima.

Por ultimo se realizara la verificación del modelo para poder determinar si el mismo cumple con el modelo generado; es decir si se apega fielmente al fenómeno observado y así mismo si hubo o no mejoría por medio de la optimización.

Capítulo 2

2. Marco teórico

La tasa de flujo volumétrico de un líquido viscoso en un canal de un extrusor son fundamentos para el análisis de transferencia de masa, transferencia de calor y los procesos de mezcla. Y aunque en (Li & Hsieh, 1994) nos muestre que esta teoría se ha podido aplicar a la operación y control de los extrusores; esto dependerá bastante de la exactitud de los resultados obtenidos.

2.1. Proceso de extrusión

Por lo general los extrusores normalmente usan un solo tornillo para alimentar, cocinar y compactar el material de la comida. La misma que puede tener diferentes fuentes como maíz, trigo, arroz, soya entre muchos otros.

El material alimenticio es por lo general primero alimentado a una máquina de preacondicionamiento, para que de esta manera se tenga una mejor absorción de agua por parte de los compuestos.

El material preacondicionado cae en la sección de alimentación de la máquina en donde hay un tornillo con hilos profundos y gruesos se encuentran presentes para evitar que este se quede atascado.

(Harmann & Harper, 1974) muestran en su trabajo que a medida que el material se mueve a través del tornillo este experimenta temperatura elevada (121 – 177 °C) y una presión de (300 – 700 psi).

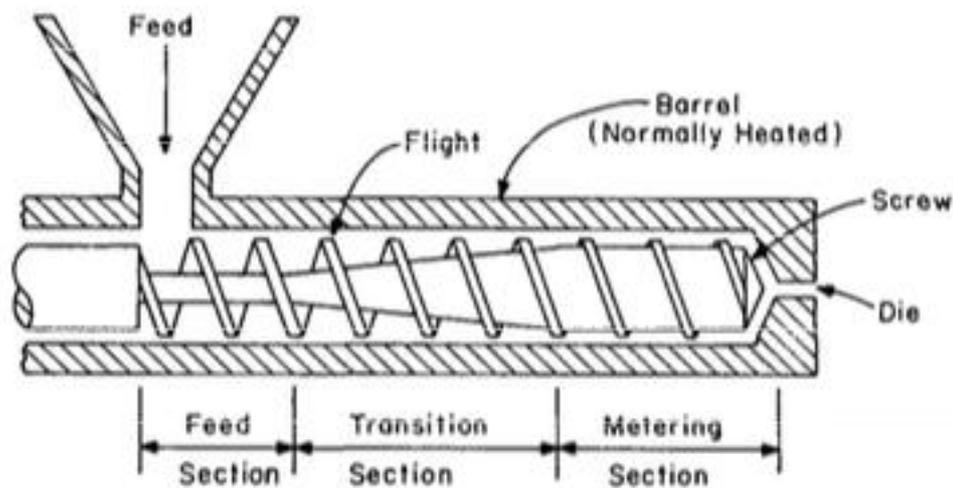


Fig. 2-1 Secciones funcionales de un extrusor típico de comida

Fuente: (Harmann & Harper, 1974)

En el gráfico anterior se puede apreciar la forma de las etapas de extrusión dentro de un extrusor usado para la industria alimenticia.

Tal como lo dice (Chiruvella, Jaluria, & Karwe, 1996) un extrusor de un tornillo simple es básicamente una bomba, un intercambiador de calor y un biorreactor que simultáneamente transporta, mezcla, calienta, cizalla, estira, forma y transforma, química y físicamente, el material bajo presión y temperatura elevadas en un cortocircuito hora. La materia prima, en forma de polvo a temperatura ambiente, se introduce en la tolva. El material se compacta primero y a continuación se suaviza y gelatiniza y / o se funde para formar un material plastificado (masa) que fluye corriente abajo en el canal del extrusor. Simultáneamente, el material experimenta transformaciones químicas y físicas debido a efectos térmicos y de cizallamiento. Estos constituyen el proceso de cocción. Más tarde, el material se forma mediante el flujo a través de la matriz en el extremo de la extrusora. El material extruido experimenta un cambio físico adicional como resultado de la expansión del extruido y la humedad se

desprende al salir de la matriz. La porosidad resultante tiene una influencia importante en las propiedades del producto que reflejan los efectos del proceso de cocción por extrusión.

El proceso de cocción por extrusión no se entiende bien porque implica cambios tanto químicos como físicos en el material y debido a la interdependencia de las propiedades y calidad del producto. Los cambios químicos determinan el grado de modificación molecular, como la gelatinización del almidón y la dextrinización. Los cambios físicos afectan las propiedades texturales tales como dureza, elasticidad y masticabilidad, así como otros atributos sensoriales como el color y el sabor, que son los factores principales en cómo un producto es recibido por el consumidor. El proceso de conversión implica tanto la gelatinización como la fusión de gránulos de almidón debido al bajo nivel de humedad (240%). El mecanismo de fusión del almidón es similar al de los termoplásticos (polímeros). Sin embargo, el proceso de gelatinización es más complejo debido a la interacción del agua con el almidón. La gelatinización tiene lugar a temperaturas relativamente más bajas en comparación con el proceso de fusión. Implica tres etapas que incluyen el hinchamiento de gránulos de almidón a medida que el agua añadida interrumpe la cristalinidad de los gránulos, la difusión de amilosa fuera de los gránulos de almidón a medida que se añade más agua y calor y finalmente la formación de gel a medida que los gránulos de almidón se derrumban

En la extrusión de alimentos, (Alavi & Ambrose, 2016; Awolu, Oluwaferanmi, Fafowora, & Oseyemi, 2015; Cheng & Hardy, 2003; Chevanan, Muthukumarappan, & Rosentrater, 2009) las materias primas en forma de partículas, gránulos que se colocan en una tolva y se alimentan al barril o

cañón del extrusor. Este barril contiene un tornillo que mezcla las partículas y las transporta por el barril. La fricción interna debida a la acción mecánica del tornillo, junto con los calentadores que rodean al barril del extrusor, hacen calentar las pastillas y las licúan. Además, la acción del tornillo hace aumentar la presión en el barril.

2.2. Instrumentación y control

Según (Rauwendaal, 1998) la instrumentación es uno de los elementos más esenciales de una extrusora. Es necesario medir parámetros importantes del proceso para saber lo que está sucediendo en la extrusora y para poder controlar el proceso. Claramente, si la temperatura de fusión de cocción no se mide, es imposible controlarla. Una razón por la que la instrumentación es tan importante es que generalmente no es posible observar lo que sucede dentro de una extrusora. Sin instrumentación en la extrusora, seríamos casi completamente ignorantes en cuanto a su funcionamiento interno.

Cuando la extrusora desarrolla un problema, estamos casi completamente dependientes de la instrumentación para determinar lo que está sucediendo dentro de la extrusora. Como resultado, una buena instrumentación es de importancia crítica cuando solucionamos problemas de extrusión.

Los parámetros más importantes del proceso son la presión de fusión y la temperatura. Son los mejores indicadores de lo bien o mal que funciona una extrusora. Los problemas de proceso, en la mayoría de los casos, se evidencian por primera vez a partir de la presión de fusión y / o lecturas de temperatura. Otros parámetros importantes del proceso son:

- La velocidad del tornillo
- La carga del motor

- Las temperaturas del barril
- Las temperaturas de los dados
- La perdida de poder entre diferentes calentadores
- El nivel de vacio puesto en la extrusion

2.2.1. Control de temperatura

En un proceso de extrusión, un buen control de temperatura es importante debido a que permite alcanzar un buen proceso estable. Existen dos tipos posibles de control de temperatura, el control encendido – apagado y el control proporcional.

2.2.1.1. Control encendido apagado

En este tipo de control , la fuente de poder no esta ni completamente encendida y ni completamente apagada. Cuando la temperatura medida esta debajo de un punto de control, se enciende al máximo a la fuente de poder, sin embargo si la temperatura empieza a aumentar por algún tiempo hasta que este alcanza al punto de control se apaga la fuente de poder. Y así se repite el proceso.

La ventaja de este tipo de control es que es sencillo y la temperatura promedio es correcta en el punto de control. La desventaja es que la temperatura actual siempre fluctúa entre ciclos de variación los cuales pueden ser largos. Entre mas grande el extrusor mas grande la variación de temperatura, es por eso que no se recomienda en extrusores.

2.2.1.2. Control Proporcional

Aquí la potencia es proporcional a la temperatura dentro de cierto rango de temperatura llamado la banda proporcional.

Inicialmente, cuando la máquina se calienta a temperatura ambiente, la energía está completamente encendida hasta que la temperatura alcanza la banda proporcional. Dentro de la banda proporcional, la potencia disminuye a medida que aumenta la temperatura. Si la temperatura supera la banda proporcional, la alimentación se apaga completamente. Cuando la temperatura disminuye en la banda proporcional, la potencia aumenta. La amplitud de las oscilaciones disminuye gradualmente y eventualmente la temperatura y la potencia alcanzan un valor constante.

La ventaja del control proporcional es que la temperatura puede mantenerse constante, a diferencia del control de encendido / apagado. El nivel de potencia puede ajustarse exactamente al nivel que se requiere para mantener la temperatura correcta. Una limitación del control proporcional simple, o control P, es que la temperatura puede ser estable sólo mientras las condiciones térmicas alrededor de la extrusora sean constantes. Cuando hay una perturbación en las condiciones térmicas, como un cambio en la temperatura ambiente, la temperatura real cambia y el P-control no es capaz de corregirlo..

De acuerdo con las misiones que debe cumplir, una extrusora debe disponer de un sistema de alimentación del material, un sistema de fusión-plastificación del mismo, el sistema de bombeo y presurización, que habitualmente generará también un efecto de mezclado y finalmente, el dispositivo para dar lugar al conformado del material fundido.

Cuando hay un trastorno en el proceso, hay una desviación temporal del punto de ajuste, pero eventualmente la temperatura real alcanzará de nuevo el punto de ajuste.

Los controladores proporcionales también pueden tener una acción derivada. Esto significa que el controlador reacciona a los cambios en la velocidad de cambio de temperatura. La velocidad de cambio de temperatura se determina por la derivada de la curva temperatura-tiempo; Por eso se llama acción derivada. El control proporcional con acción derivada se denomina control PD; Con acción integradora y derivada, control PID. El control PID se utiliza comúnmente en extrusoras.

Para que un controlador funcione correctamente en un extrusor, el controlador tiene que ajustarse a las características del extrusor. Ajustar un controlador PID implica determinar el ancho correcto de la banda proporcional y las constantes de tiempo para la integración y la acción derivada. Incluso el mejor controlador proporcionará un control muy pobre si no está ajustado correctamente. Como resultado, se debe prestar atención a los controladores de sintonización que requieren ajuste manual. Hoy en día, hay un número de controladores que se sintonizan automáticamente, los denominados controladores de "autoajuste" o "autoajuste". Con estos controladores uno no tiene que preocuparse de ajustar manualmente los controladores.

No todas las extrusoras presentan todas las funciones anteriormente mostradas durante la operación así lo muestran (Chevanan et al., 2009; Chevanan, Rosentrater, & Muthukumarappan, 2007; Han, Lee, & Wheeler, 1996). En ocasiones el producto final obtenido no adquiere forma hasta un proceso secundario, por lo cual el conformado no tiene que ser definitivo; así mismo la degasificación se da únicamente en las máquinas preparadas para eso.

2.3. Extrusoras de doble tornillo

Las extrusoras de dos tornillos presentan posibilidades que a menudo superan en gran medida a las de un solo tornillo. Así lo muestran (Altomare & Ghossi, 1986; Chevanan et al., 2007; Wenger, Wenger, Rokey, & Spellmeier, 2014).

La aparición de extrusores de doble tornillo, que se entrelazan, que se entrelazan, en aplicaciones de procesos alimenticios no es sorprendente. Con su capacidad para proporcionar un medio de transporte casi positivo, las extrusoras de doble tornillo superan una de las mayores limitaciones de las máquinas de tornillo único. Esa limitación es una dependencia de la fricción entre el material y la pared del cañón para conseguir una buena acción de transporte. El transporte mejorado de los extrusores de doble tornillo permite un funcionamiento con sistemas de alta humedad y baja viscosidad. Además, el transporte mejorado permite que el extrusor sea operado en un modo sin supervisión; No es necesario llenar el canal del tornillo. A diferencia de las extrusoras de tornillo único, las velocidades de avance de dos tornillos no están relacionadas con la velocidad del tornillo y, en su mayor parte, no están influenciadas por el flujo de presión causado por la restricción en la matriz. Las velocidades de avance y velocidad del tornillo se pueden elegir independientemente para obtener los niveles de cizallamiento deseados, los insumos de energía y las características del producto.

Los alimentos están entre los más complejos de ser extruidos. Compuesto de almidón, azúcares, proteínas, agua, lípidos, sales. Etc., el alimento pasa por una serie de cambios químicos y físicos interrelacionados conocidos como "cocinar" durante su paso a través de las zonas de cizallamiento y calentamiento del extrusor. Si en última instancia se trata de controlar la

"cocción" o la uniformidad, es importante entender cómo los cambios en las condiciones de operación de la extrusión afectan al proceso de extrusión de alimentos. La distribución del tiempo de residencia se ha utilizado durante mucho tiempo tanto en el polímero como en los campos alimentarios para ayudar a comprender los efectos de las variables de procesamiento por extrusión.

Entre las ventajas que presentan se incluye una buena capacidad de mezclado y desgasificación, y un buen control del tiempo de residencia y de su distribución. El dispositivo de fusión-plastificación, bombeo y mezclado está constituido por un tornillo de Arquímedes que gira en el interior de un cilindro calentado, generalmente mediante resistencias eléctricas. En la parte del cilindro más alejada de la tolva de alimentación se acopla un cabezal cuya boquilla de salida tiene el diseño adecuado para que tenga lugar el conformado del producto. La parte esencial de la máquina es el sistema cilindro-tornillo que, como consecuencia del giro, compacta el alimento sólido, da lugar a la fusión del material y lo transporta hacia la boquilla de conformado, produciendo al mismo tiempo la presurización y el mezclado del material. Todas las extrusoras se consideran divididas en tres zonas, junto con la evolución de la presión a lo largo de la extrusora.

2.4. Partes de un extrusor

2.4.1. Tolva

La tolva es el componente del extrusor de diseño más simple, aunque no por eso de menor importancia. El material debe ser el suficiente para que se tenga una alimentación constante al sistema y este se mantenga trabajando de manera ininterrumpida.

Como elemento de seguridad se coloca, por lo regular, una trampa magnética en la parte inferior, la cual evita que partículas metálicas que estén mezcladas con el material entren al sistema, pudiendo dañar el tornillo o el barril.

Las entradas de materiales a la extrusora en la base de la tolva tienen que ser muy bien refrigeradas por agua, a efecto que dichos materiales no se apelmacen y dejen siempre el pasaje del material libre y a su vez impidan que el material y/o gases muy calientes retrocedan por la presión interna dentro del cilindro.

2.4.2. Barril de extrusión (cilindro)

El barril básicamente es un cilindro hueco de gran espesor, para que pueda soportar las presiones generadas en su interior por el husillo y el plástico. Se encarga de transmitir el calor de las resistencias al polímero, que en este caso es polietileno.

El barril debe tener una ranura para la alimentación de material o en ciertas ocasiones se le puede agregar una pieza que se acopla al barril y sirve como entrada de material; en algunos casos se le agrega una ranura de ventilación la cual permite el escape de vapores, aunque en la actualidad es más utilizado un sistema externo de secado, lo cual resulta más factible.

2.4.3. El Tornillo de Extrusión

El tornillo o husillo consiste en un cilindro largo rodeado por un filete helicoidal. El tornillo es una de las partes más importantes ya que contribuye a realizar las funciones de transportar, calentar, fundir y mezclar el material. La estabilidad del proceso y la calidad del producto que se obtiene dependen en gran medida del diseño del tornillo. Los parámetros más importantes en el diseño del tornillo son su longitud (L), diámetro (D), el ángulo del filete (θ) y el paso de rosca (w).

El material se va presurizando a medida que avanza por el tornillo, comenzando con presión atmosférica en la tolva y aumentando hasta la salida por la boquilla. La sección de paso del tornillo no es constante, si no que es mayor en la zona de alimentación (mayor profundidad de canal).

2.4.4. Sistema de calentamiento

Según (Chen, Jong, & Chang, 2006; Diosady, Paton, Rosen, Rubin, & Athanassoulis, 1985) existen varias fuentes de calor en el barril para poder llevar el plástico a una temperatura deseada. Primero está el calor que se transmite por medio del barril y que por lo regular es generado por resistencias eléctricas, el otro es generado mediante la fricción causada por el tornillo y el material.

La mayor cantidad de calor proviene de la resistencia al movimiento por parte del tornillo; este genera fricción a lo que se mueve dentro del barril. Sin embargo esto al momento de entrar en funcionamiento tiene que ser considerado debido a que se crea un equilibrio del flujo de calor.

2.4.5. Plato Rompedor Y Filtros

El plato rompedor se encuentra al final del cilindro. Se trata de un disco delgado de metal con agujeros, el propósito del plato es servir de soporte a un paquete de filtros cuyo fin principal es atrapar los contaminantes para que no salgan con el producto extruido. Los filtros además mejoran el mezclado y homogenizan el fundido. Los filtros van apilados delante del plato rompedor, primero se sitúan los de malla más ancha, reduciéndose el tamaño de malla progresivamente. Detrás se sitúa un último filtro también de malla ancha y finalmente el plato rompedor que soporta los filtros.

2.4.6. Cabezal y Boquilla

El cabezal es la pieza situada al final del cilindro, que se encuentra sujetando la boquilla y por lo general manteniendo el plato rompedor. Generalmente va atornillado al cilindro. El perfil interno del cabezal debe facilitar lo más posible el flujo del material hacia la boquilla. El material fluye del cilindro a la boquilla a través del torpedo, situado en el cabezal. La sección transversal de los soportes del torpedo se diseña para proporcionar el flujo de material a velocidad constante.

2.4.7. Cabezal de corte

Estos cabezales son los que generarán el producto final, o sea, los pellets (perlas) de material recuperado. Hoy en día hay cabezales de “corte en cabeza” que no requieren la batea de enfriamiento y obtienen un corte parejo, a diferencia del tipo “garlopa” o “engranaje cortante”, permitiendo trabajar en un circuito casi cerrado que por chorro de aire, seca el material y lo impulsa a una tolva embolsadora. (Awolu et al., 2015; Chevanan et al., 2009; Chevanan, Rosentrater, & Muthukumarappan, 2010; Diosady et al., 1985; Haubjerg, Veje, Jørgensen, Simonsen, & Løvgreen, 2015) Muestran en sus trabajos diferentes cabezales de corte y como estos afectan directamente al modelamiento del sistema es importante considerar el cabezal de corte para poder verificar correctamente si se están tomando todas las pérdidas por calor posibles.

Capítulo 3

3. Metodología de la investigación

3.1. Enfoque investigativo

La presente investigación es una investigación de tipo cuantitativa debido a que se plantea un problema delimitado y concreto. Se hizo un exhaustivo análisis de literatura antes de poder hacer el planteamiento de la pregunta de investigación. Esto así mismo permitió la generación de la hipótesis de investigación.

Para esta investigación se dio que la naturaleza de los datos es numérica, debido a que se tomaron mediciones numéricas en diferentes lapsos de tiempo. Lo cual permitió que la recolección de datos sea basada en instrumentos estandarizados; termo cúpulas y sensores electrónicos. Esto permite que los datos sean validos y confiables.

3.2. Alcance de la investigación

Esta investigación se la puede plantear de forma exploratoria, sin embargo, se debe recordar que aunque para este fin específico no hay muchas aplicaciones el proceso de extrusión de tornillo simple se ha estudiado a profundidad por lo cual esta investigación tiene un alcance correlacional.

Esto se da debido a que se pretende recolectar información para tener una estimación de las variables que se necesitan para el funcionamiento del extrusor, lo que nos va a llevar a generar un modelo matemático.

3.3. Pregunta de investigación

Existe una temperatura óptima para el extrusor la cual garantice la máxima producción del producto T-280-7?.

3.4. Hipótesis de investigación

Se sabe por (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2003) las variables deben ser comprensibles precisas y concretas. Por lo cual se genero la hipótesis previamente presentada en el capítulo 1 debido a que la relación entre las variables es clara y verosímil.

En esta investigación existen algunas variables independientes las cuales se van a estudiar para verificar si se tiene una predicción verídica del estado inicial del extrusor.

Esta hipótesis de investigación es del tipo causal debido a que se tienen relaciones entre dos o mas variables las cuales afirman la forma en la cual se están manifestando y estas presentan entendimiento con la relación del modelo generado.

3.5. Elección del diseño de investigación

Aquí se tiene un modelo experimental, debido a que es una situación de control en la cual se manipularon varias variables para analizar si hubo un incremento o no de la producción. Tal como se muestra en el capítulo 4 realizo un grupo de control para el modelo matemático, en el cual se obtuvieron datos brutos.

Se escogió la metodología experimental debido a que los datos obtenidos presentan validez interna; es decir, se tiene un grado de confianza de los resultados posibles generados por el modelo y que estos se interpreten adecuadamente. Así mismo como se realizo mas de una medición experimental se puede decir que se tiene control del modelo generado debido a que se realizaron varias tomas de datos.

Capítulo 4

4. Modelamiento matemático para el análisis de la optimización al proceso de extrusión

Siempre que se realiza un modelo matemático se trata de usar el modelo mas simple para poder ajustarlo a las mediciones actuales o al fenómeno físico que se quiere explicar.

Tal como (P. M. M. Bongers, 2006) y (Trommelen, 1967) establecieron en sus trabajos se pueden ver diferentes modelos matemáticos, sin embargo, para cada modelo hay que considerar las características que hacen único al modelo como tal. (P. M. M. Bongers, 2006) asume que se considera al extrusor como un reactor de agitado continuo. Esto mismo se asumirá en la generación del modelo matemático; sin embargo se mantendrán ciertas restricciones.

Si se revisan los aportes dados por las siguientes patentes: (D, 1973; Daane & Justus, 1965; Faillace, 1981, 1992; Pettit, 1973; Wiedmann, 1988) se puede verificar que se toma como control la temperatura del extrusor, el torque del motor, la presión entrante y la presión saliente. Estos cuatro parámetros van a ser los mas relevantes para el diseño experimental y para el modelo matemático. Y aunque existen mas variables a considerar según (Awolu et al., 2015; Covas, Cunha, & Oliveira, 1999; Garg & Singh, 2010; Shankar & Bandyopadhyay, 2004) estos son los mas relevantes y van a ser únicos por cada modelo o tipo de extrusor y alimento a extruir.

4.1. Nomenclatura

| | | |
|----------------|---------------------------------------|---------------------|
| C_p | Calor específico | $J/(kg^{\circ}C)$ |
| D | Diámetro del extrusor | m |
| h | Entalpia | J/kg |
| K | Consistencia | [-] |
| L | Longitud del extrusor | m |
| r | Radio entre gas y liquido | [-] |
| m | Masa | kg |
| n | Constante de potencia | [-] |
| N_r | Velocidad rotacional | 1/s |
| T | Temperatura | $^{\circ}C$ |
| Q | Flujo de calor total | J/s |
| V | Volumen | m^3 |
| v | Velocidad | m/s |
| w | Flujo másico | kg/s |
| α | Coeficiente de transferencia de calor | $J/(m^2s^{\circ}C)$ |
| $\dot{\gamma}$ | Frecuencia de corte | 1/s |
| λ | Conductividad térmica | $J/(ms^{\circ}C)$ |
| ρ | Densidad | kg/m^3 |

4.2. Modelamiento del extrusor

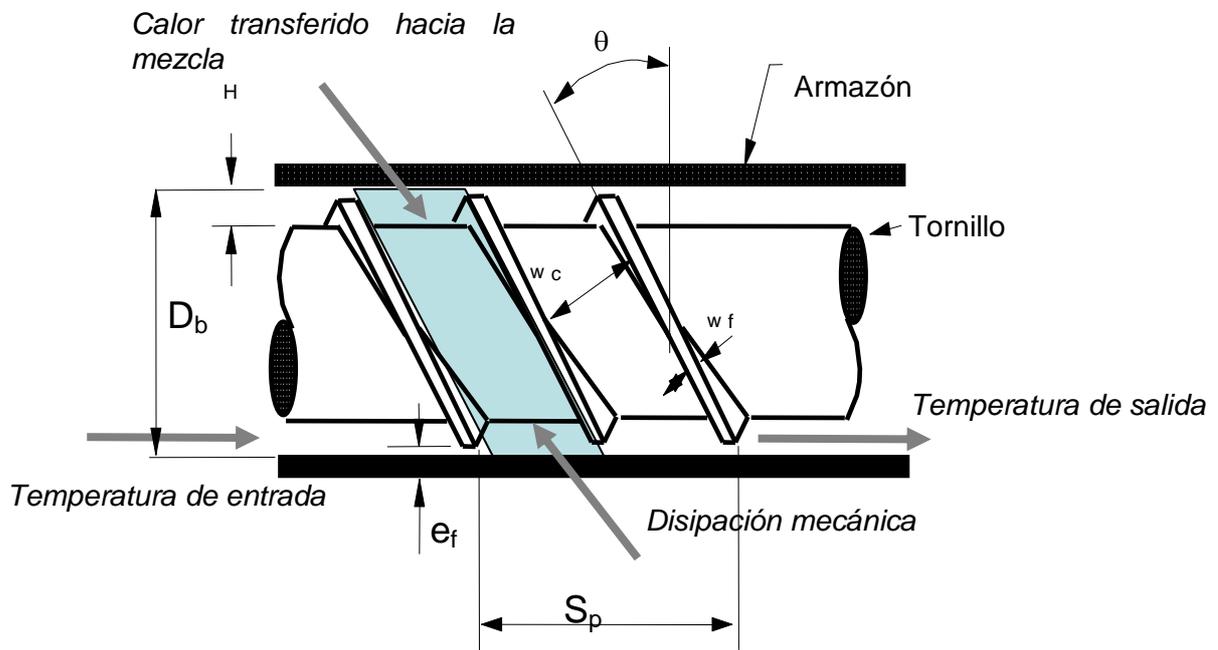


Fig. 4-1 Aproximación del modelo

Se formularon los balances de materia y energía para cada etapa del modelo.

4.2.1. Balance de masa

Se presenta la siguiente ecuación el balance de masa

$$\frac{dm}{dt} = W_{in} - W_{out}$$

Ecuación 4-1 Ecuación de balance de masa

Usando el siguiente ratio $r = \frac{m_{gas}}{m_{liquid} + m_{gas}}$ entre las fases gaseosa y la fase

solido/liquido. La ecuación para el balance de la masa queda de la siguiente forma:

$$\frac{dm_{gas}}{dt} = r_{in}W_{in} - r_{out}W_{out}$$
$$\frac{dm_{liquid}}{dt} = (1 - r_{in})W_{in} - (1 - r_{out})W_{out}$$

Ecuación 4-2 Ecuaciones de balance de masa usando el ratio entre gases y líquidos

En donde para la primera ecuación se tiene el balance de masa producido solo por los gases y en la segunda solo para los líquidos. Estas se obtienen de la asunción de que se puede tener una etapa solida/liquida, se debe multiplicar cada trabajo por su respetivo r . Para el caso del liquido con la masa del liquido como denominador dividido para la suma de las masas liquidas y gaseosas; es decir la masa total, para fines de simplicidad se mantiene un valor de r estándar es por eso que se tiene el termino $(1 - r)$.

4.2.2. Balance de energía

$$m \frac{dh}{dt} = w_{total}(h_{in} - h_{out}) + Q_{viscocidad} + Q_{friccion} + Q_{sumministrado}$$

Ecuación 4-3 Ecuación de balance de energía

Para lo cual se cumple que $dh = C_p dt$ y así mismo la energía generada por movimientos mecánicos se la considera, debido a que esto puede generar

sobre calentamiento en la mezcla y una mezcla sobrecalentada es mas propensa a generar problemas de no conformidad.

Se estima que la disipación puede ser obtenida de dos fuentes principales: la viscosidad y la fricción. La disipación por viscosidad se da debido a que la mezcla tiene que entrar en contacto con las aspas del extrusor y la perdida por fricción se genera debido al rozamiento del armazón y las aspas. Se calcula la disipación de viscosidad por medio de la teoría de mezcla laminar (P. Bongers & Almeida-Rivera, 2011; Flumerfelt, Pierick, Cooper, & Bird, 1969)

$$Q_{viscodidad} = \tau \dot{\gamma} V + \frac{w}{m} \Delta p$$

Ecuación 4-4 Ecuación de disipación de viscosidad para una mezcla laminar

En donde se tiene que Δp es casi 0, debido a que el liquido como tal no es lo suficientemente compacto como para generar una diferencia de presión interna por lo cual queda la ecuación de la siguiente manera:

$$Q_{viscodidad} = \tau \dot{\gamma} V$$

Ecuación 4-5 Ecuación de disipación de viscosidad simplificada

Para esto se necesita la viscosidad del fluido la cual fue derivada de la siguiente manera:

$$\tau_{rz} = -K \left| \frac{\partial V_z}{\partial r} \right|^{n-1} \frac{\partial V_z}{\partial r}$$

Ecuación 4-6 Ecuación de viscosidad del compuesto T-280-7

En donde K y n son constantes determinadas experimentalmente. Según (P. M. M. Bongers, 2006) se tiene que el calor por fricción seria:

$$Q_{friccion} = c_1 S (T - T_{enfriamiento})^{\frac{5}{3}} N_r^{1.5} L_{seccion}$$

Ecuación 4-7 Ecuación de perdida de calor por fricción

en donde para este caso $T_{\text{enfriamiento}}$ es igual a 0, c_1 es determinado experimentalmente y N_r es la velocidad de rotación del motor.

Se sabe por (P. Bongers & Almeida-Rivera, 2011) que el calor suministrado puede ser expresado de la siguiente manera:

$$Q_{\text{subministrado}} = \alpha (T - T_{\text{subministrado}}) \pi D L$$

Ecuación 4-8 Ecuación del calor subministrado

Se asumió que el coeficiente de transferencia de calor estaba limitando la resistencia del líquido contra el armazón por lo cual basados en la teoría de penetración de (Trommelen, 1967) se tiene que:

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{\rho C_p N_{\text{cuchillas}} N_r D \lambda}{\pi * \left(\frac{W_c}{\tan \theta}\right)}}$$

Ecuación 4-9 Ecuación del coeficiente de transferencia de calor

4.2.3. Balance de energía mecánica

La energía mecánica disipada por la mezcla y la energía usada para mover el producto a lo largo del armazón al rotar el tornillo permiten formar la siguiente relación:

$$2\pi N_r M_r = Q_{\text{friccion}} + Q_{\text{viscosidad}}$$

Ecuación 4-10 Ecuación de balance de energía mecánica

Según (Flumerfelt et al., 1969) el flujo unidimensional en un canal estrecho, dados por la presión y el arrastre del tornillo no se pueden resolver analíticamente pero se pueden aproximar por componentes individuales de la siguiente manera:

$$w_{presion} = \rho \frac{nH^2 w_c}{2(2n+1)} \left(\frac{\Delta p H}{2KL} \right)^{\frac{1}{n}}$$

Ecuación 4-11 Ecuación de presión de trabajo

$$w_{arrastre} = \rho \frac{H w_c}{2} \pi D_c \cos \theta N_r$$

Ecuación 4-12 Ecuación de trabajo de arrastre

en donde Δp es la pérdida de presión entre elementos consecutivos y H es el calor de fusión.

Por lo cual si le agregamos un factor de corrección (Li & Hsieh, 1994) debido a la existencia de imperfecciones en el tornillo y también por la presencia de los dados se tiene la siguiente ecuación final:

$$w_{total} = F_d \frac{1}{4} \rho \pi D_c^2 N_r \cos \theta w_c \left(\frac{D_f^2 \ln \left(\frac{D_f}{D_c} \right)}{D_f^2 - D_c^2} - \frac{1}{2} \right) + F_p \rho \frac{nH^2 w_c}{2(2n+1)} \left(\frac{\Delta p H}{2KL} \right)^{\frac{1}{n}}$$

Ecuación 4-13 Ecuación del trabajo total generado

La presión de cada uno de los elementos es calculado usando la masa del gas en el elemento y tratándolo como gases ideales.

Este modelo fue implementado usando el paquete de simulación de MATLAB-SIMULINK para hacer predicciones de la temperatura del producto extruido, así mismo como energía mecánica disipada y tasa de transferencia de calor.

4.2.4. Validación experimental del modelo

Para el proceso de extrusión se cuenta en la fabrica con un extrusor de la marca Wegner modelo X-185, el cual cuenta con un motor de 250 HP y 1191 RPMs.

Así mismo para poder simplificar el modelo y poder hacerlo más práctico se asumió que la viscosidad del fluido es muy similar a la del agua; debido a la alta dispersión de partículas dentro de la disolución. Y así mismo se asumió que la constante c_1 es similar a 1; debido a que esta es solo una constante de proporcionalidad y no influiría directamente en los resultados finales.

Así mismo se tomaron datos referenciales de (Haubjerg, Veje, & Simonsen, 2015), el cual contiene datos parecidos a la composición actual obtenida.

Dentro del modelo operacional se puede ver al proceso de extrusión como algo compuesto de dos partes tal como se supuso en el modelo.

El resultado de calcular el modelo matemático usando un solver numérico nos permitió obtener como mejor valor de ajuste con una tolerancia de ± 1 °C, así mismo se enfoco el modelo solo a optimizar la variable de temperatura para lo cual se establecieron las condiciones de frontera establecidas en la tabla 4.1.

La temperatura optima fue de 112; lo cual se debía confirmar experimentalmente, por lo tanto se planteo la configuración de la siguiente manera:

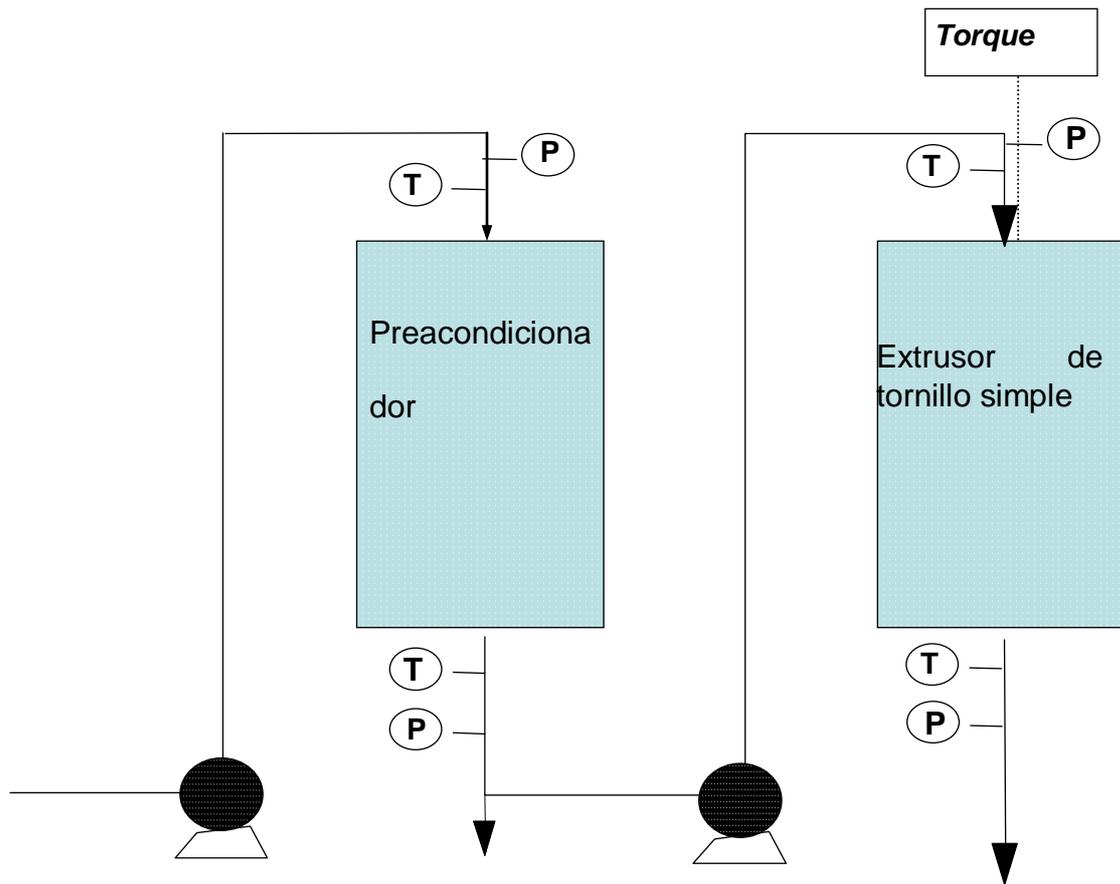


Fig. 4-2 Modelo experimental de operación



Fig. 4-3 Configuración del extrusor

Fig. 4-4 Cabezal del extrusor

La temperatura fue medida de las válvulas de ingreso y salida. El torque se lo midió por el panel electrónico de control.

Se realizo el control en tres etapas las cuales se muestran en la siguiente tabla:

| | | Control de procesos | | |
|--------------------------------|----------|---------------------|--------|--------|
| Toma de datos | Unidades | Toma 1 | Toma 2 | Toma 3 |
| Agua preacondicionador. | lt/min | 16 | 12 | 14 |
| Vapor preacondicionador | Lbs/min | 75 | 75 | 75 |
| Temperatura preacondicionador | °C | 90 | 95 | 94 |
| Amperaje extruder | % - Amp | 220 | 260 | 280 |
| Vapor extruder | PSI | 59 | 52 | 50 |
| Temperatura extruder | °C | 118 | 118 | 118 |
| Placa de restricción | pulg. | 8 | 8 | 8 |
| Dado | mm | 141 | 141 | 141 |
| Tipos de Cuchillas | [-] | Gancho | Gancho | Gancho |
| Numero de cuchillas | mm | 12 | 12 | 12 |
| Porcentaje de flotabilidad | % | 100 | 100 | 100 |
| Densidad del producto extruido | g/lt | 380 | 380 | 400 |

Tabla 4-1 Recopilación de datos brutos para el producto T-280-7

Se realizo el siguiente proceso, se empezó con la temperatura inicial provista y se realizaron 3 lotes de prueba para poder ir variando la temperatura en escala de dos grados Celsius. Por cada lote se vio cuanto fue producido y se lo

comparo con los valores de producción referencial para esto se realizo la siguiente tabla con los resultados obtenidos:

| Lote | Reducción en grados Celsius | Aumento de la producción |
|----------|-----------------------------|--------------------------|
| Lote # 1 | 2 | 10 % |
| Lote # 2 | 2 | 15 % |
| Lote # 3 | 2 | 25 % |

Tabla 4-2 Tabla comparativa de reducción de grados y el aumento de la producción

Se encontró que la temperatura ideal de funcionamiento para el extrusor fue de 112 grados Celsius, esto redujo los errores producidos por el sobrecalentamiento de la mezcla. Así se pudo comprobar que el valor obtenido por el modelo matemático se ajusta a los valores observados por el extrusor.

Esto muestra que existe una correlación directa entre la temperatura del extrusor y el proceso operativo de la planta, lo que puede llevar a mejores ingresos porque se sabe que se puede aumentar la 1 cantidad a producir

Capítulo 5

5.1 Conclusiones

- Se pudo calcular mediante el modelo matemático generado que la temperatura ideal del sistema de extrusión de la planta era de 117 °C, y que este aumentó la eficiencia en la producción, manteniendo los parámetros de la calidad.
- Mediante la validación del modelo, se denota lo operativo de lo mismo y lo eficiente que fue este para línea de producción.
- Con el modelo matemático ya establecido, la herramienta Matlab y Simulink, nos dio la temperatura óptima esperada y que esta tiene correlación con el proceso.

5.2 Recomendaciones

- Se pueden quitar asunciones que se han hecho y generalizarlo para otro producto, es decir, diversos parámetros o cambios de formulaciones.
- Así también se pueden considerar más pérdidas, referentes a las transferencias de calor, así mismo, se puede sacar la función de transferencia del mismo para tener un modelo mas completo y ver como se complementan.

Bibliografía

- Alavi, S., & Ambrose, R. P. K. (2016). Particulate Flow and Agglomeration in Food Extrusion *Production, Handling and Characterization of Particulate Materials* (pp. 137-155): Springer.
- Altomare, R. E., & Ghossi, P. (1986). An analysis of residence time distribution patterns in a twin screw cooking extruder. *Biotechnology Progress*, 2(3), 157-163.
- Awolu, O. O., Oluwaferanmi, P. M., Fafowora, O. I., & Oseyemi, G. F. (2015). Optimization of the extrusion process for the production of ready-to-eat snack from rice, cassava and kersting's groundnut composite flours. *LWT-Food Science and Technology*, 64(1), 18-24.
- Bongers, P., & Almeida-Rivera, C. (2011). Dynamic modelling of the margarine production process. In M. C. G. E.N. Pistikopoulos & A. C. Kokossis (Eds.), *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. Volume 29, pp. 1301-1305): Elsevier.
- Bongers, P. M. M. (2006). A heat transfer model of a scraped surface heat exchanger for ice cream. *Computer Aided Chemical Engineering*, 21, 539-544. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S1570-7946\(06\)80101-X](http://dx.doi.org/10.1016/S1570-7946(06)80101-X)
- Chen, S. C., Jong, W. R., & Chang, J. A. (2006). Dynamic mold surface temperature control using induction heating and its effects on the surface appearance of weld line. *Journal of Applied Polymer Science*, 101(2), 1174-1180.
- Cheng, Z. J., & Hardy, R. W. (2003). Effects of extrusion processing of feed ingredients on apparent digestibility coefficients of nutrients for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture nutrition*, 9(2), 77-83.

- Chevanan, N., Muthukumarappan, K., & Rosentrater, K. A. (2009). Extrusion studies of aquaculture feed using distillers dried grains with solubles and whey. *Food and Bioprocess Technology*, 2(2), 177-185.
- Chevanan, N., Rosentrater, K. A., & Muthukumarappan, K. (2007). Twin-screw extrusion processing of feed blends containing distillers dried grains with solubles (DDGS). *Cereal Chemistry*, 84(5).
- Chevanan, N., Rosentrater, K. A., & Muthukumarappan, K. (2010). Effects of processing conditions on single screw extrusion of feed ingredients containing DDGS. *Food and Bioprocess Technology*, 3(1), 111.
- Chiruvella, R. V., Jaluria, Y., & Karwe, M. V. (1996). Numerical simulation of the extrusion process for food materials in a single-screw extruder. *Journal of Food Engineering*, 30(3-4), 449-467.
- Covas, J. A., Cunha, A. G., & Oliveira, P. (1999). An optimization approach to practical problems in plasticating single screw extrusion. *Polymer Engineering & Science*, 39(3), 443-456.
- D, H. (1973). Extruder control system: Google Patents.
- Daane, R. A., & Justus, E. J. (1965). Plastic extruder with automatic temperature control: Google Patents.
- Diosady, L. L., Paton, D., Rosen, N., Rubin, L. J., & Athanassoulis, C. (1985). Degradation of wheat starch in a single - screw extruder: mechano - kinetic breakdown of cooked starch. *Journal of Food Science*, 50(6), 1697-1699.
- Faillace, L. M. (1981). Extruder temperature controller: Google Patents.
- Faillace, L. M. (1992). Extruder temperature controller and method for controlling extruder temperature: Google Patents.

- Flumerfelt, R., Pierick, M., Cooper, S. L., & Bird, R. (1969). Generalized plane Couette flow of a non-Newtonian fluid. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 8(2), 354-357.
- Garg, S. K., & Singh, D. S. (2010). Optimization of extrusion conditions for defatted soy-rice blend extrudates. *Journal of food science and technology*, 47(6), 606-612.
- Han, C. D., Lee, K. Y., & Wheeler, N. C. (1996). Plasticating single - screw extrusion of amorphous polymers: Development of a mathematical model and comparison with experiment. *Polymer Engineering & Science*, 36(10), 1360-1376.
- Harmann, D. V., & Harper, J. M. (1974). Modeling a forming foods extruder. *Journal of Food Science*, 39(6), 1099-1104.
- Haubjerg, A. F., Veje, C., & Simonsen, B. (2015). *Experimental investigation of physical properties and mechanical durability of extruded fish feed in the drying process*. Paper presented at the 5th European Drying Conference.
- Haubjerg, A. F., Veje, C. T., Jørgensen, B. N., Simonsen, B., & Løvgreen, S. (2015). Structural Properties and Mechanical Durability of Extruded Fish Feed. *Journal of Food Process Engineering*, 38(6), 621-631.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2003). Metodología de la investigación. *La Habana: Editorial Félix Varela*, 2.
- Li, Y., & Hsieh, F. (1994). NEW MELT CONVEYING MODELS FOR A SINGLE SCREW EXTRUDER1. *Journal of Food Process Engineering*, 17(3), 299-324. doi:10.1111/j.1745-4530.1994.tb00341.x
- Pettit, G. (1973). Plastic extruder temperature control system: Google Patents.
- Rauwendaal, C. (1998). *Understanding extrusion*: Hanser.

- Shankar, T. J., & Bandyopadhyay, S. (2004). Optimization of extrusion process variables using a genetic algorithm. *Food and Bioprocess Processing*, 82(2), 143-150.
- Trommelen, A. (1967). Heat transfer in a scraped-surface heat exchanger. *Trans. Inst. Chem. Eng*, 45(5), 176-178.
- Wenger, L., Wenger, M. L., Rokey, G. J., & Spellmeier, A. C. (2014). Twin screw extruders operating with significantly reduced specific mechanical energy inputs: Google Patents.
- Wiedmann, W. (1988). Method and apparatus for extruding a food product: Google Patents.